

# PATENT ABSTRACTS OF JAPAN

(11)Publication number : 2000-194881

(43)Date of publication of application : 14.07.2000

(51)Int.Cl.

G06T 17/20

(21)Application number : 10-366722

(71)Applicant : SUZUKI MOTOR CORP

(22)Date of filing : 24.12.1998

(72)Inventor : SAITO MASAKI

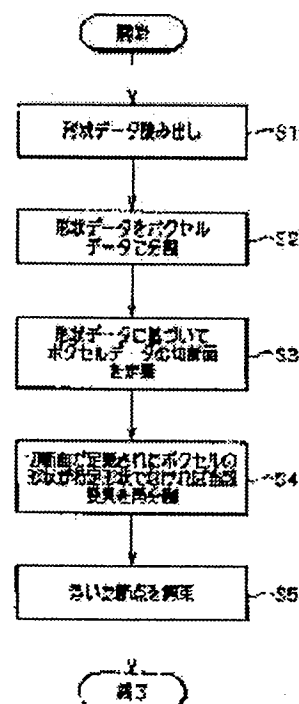
WAKABAYASHI MASAYASU

(54) METHOD AND DEVICE FOR PREPARING ANALYSIS MODEL AND STORAGE MEDIUM  
STORING PROGRAM FOR ANALYSIS MODEL DATA PREPARATION OR ANALYSIS MODEL  
DATA

(57)Abstract:

PROBLEM TO BE SOLVED: To automate division from shape data to elements while reducing the number of the elements without grading analysis accuracy even for the analysis object of a complicated shape.

SOLUTION: This method is provided with a shape data readout step S1 for reading the shape data in which the surface shape of the analysis object is defined, a voxel data division step S2 for dividing the shape data read in the shape data readout step S1 into rectangular parallelepiped voxel data and a cutting surface definition step S3 for defining a cutting surface cut by the surface of the shape data for a part or all of the voxel data divided in the voxel data division step S2. Then, the intersection of the cutting surface of each voxel defined in the cutting surface definition step S3 and the side of the voxel is defined as a fit node (fit node definition step).



## LEGAL STATUS

[Date of request for examination]

18.11.2002

[Date of sending the examiner's decision of rejection]

[Kind of final disposal of application other than the examiner's decision of rejection or application converted registration]

[Date of final disposal for application]

[Patent number]

[Date of registration]

[Number of appeal against examiner's decision of rejection]

[Date of requesting appeal against examiner's decision of rejection]

(19) 日本国特許庁 (J P)

(12) 公開特許公報 (A)

(11) 特許出願公開番号

特開2000-194881

(P2000-194881A)

(43) 公開日 平成12年7月14日 (2000.7.14)

(51) IntCl.<sup>7</sup>

G 0 6 T 17/20

識別記号

F I

G 0 6 F 15/60

データベース (参考)

6 1 2 J 5 B 0 4 6

審査請求 未請求 請求項の数18 O L (全 17 頁)

(21) 出願番号 特願平10-366722

(22) 出願日 平成10年12月24日 (1998. 12. 24)

(71) 出願人 000002082

スズキ株式会社

静岡県浜松市高塚町300番地

(72) 発明者 斎藤 正毅

神奈川県横浜市都筑区桜並木2番1号 ス

ズキ株式会社技術研究所内

(72) 発明者 若林 正泰

神奈川県横浜市都筑区桜並木2番1号 ス

ズキ株式会社技術研究所内

(74) 代理人 100079164

弁理士 高橋 勇

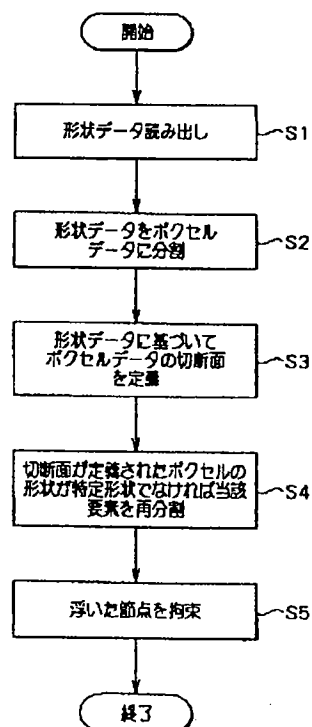
Fターム (参考) 5B046 DA02 FA06 FA18 GA01 JA07

(54) 【発明の名称】 解析モデルを作成する方法および装置並びに解析モデルデータ作成用プログラム若しくは解析モデルデータを記憶した記憶媒体

(57) 【要約】

【課題】 複雑な形状の解析対象物であっても、解析精度を悪化させずに要素数を削減しつつ、形状データから要素への分割を自動化すること。

【解決手段】 解析対象の表面形状が定義された形状データを読み出す形状データ読み出し工程 S1 と、この形状データ読み出し工程 S1 にて読み出された形状データを直方体であるボクセルデータに分割するボクセルデータ分割工程 S2 と、このボクセルデータ分割工程 S2 にて分割されたボクセルデータの一部又は全部について前記形状データの表面によって切断される切断面を定義する切断面定義工程 S3 とを備えている。そして、この切断面定義工程 S3 で定義された各ボクセルの切断面と当該ボクセルの辺の交点をフィット節点として定義する (フィット節点定義工程)。



## 【特許請求の範囲】

【請求項1】 演算装置を使用して解析モデルデータを作成する解析モデルデータ作成方法であって、解析対象の表面形状が定義された形状データを読み出す形状データ読み出し工程と、この形状データ読み出し工程にて読み出された形状データを直方体であるボクセルデータに分割するボクセルデータ分割工程と、このボクセルデータ分割工程にて分割されたボクセルデータの一部又は全部について前記形状データの表面によって切断される切断面を定義する切断面定義工程と、この切断面定義工程で定義された各ボクセルの切断面と当該ボクセルの辺の交点をフィット節点として定義するフィット節点定義工程とを備えたことを特徴とする解析モデル作成方法。

【請求項2】 前記切断面定義工程は、1つのボクセルに対して切断面が2つある場合には一方の切断面を選択する切断面選択工程を備えたことを特徴とする請求項1記載の解析モデル作成方法。

【請求項3】 前記フィット節点定義工程に続いて、前記フィット節点を有するボクセルと接続するボクセルの節点とを拘束するフィット節点拘束工程を備えたことを特徴とする請求項1又は2記載の解析モデル作成方法。

【請求項4】 前記フィット節点定義工程に前後して、前記切断面を有するボクセルである要素のうち予め定められた立体形状となっていない要素を検索すると共に当該要素を前記予め定められた立体形状となるまで分割する要素分割工程と、この要素分割工程によって生成された要素の当該分割による分割節点を当該節点と接する要素の節点に基づいて拘束する分割節点拘束工程とを備えたことを特徴とする請求項1又は2記載の解析モデル作成方法。

【請求項5】 前記形状データの表面に対する形状フィット指令が当該形状データの面毎に入力される形状フィット指令入力工程と、この形状フィット指令入力工程にて入力された形状フィット指令の適用対象となる形状データの表面に含まれるボクセルを抽出すると共に当該抽出したボクセルを前記切断面定義工程に入力する指令入力ボクセル抽出工程とを備えたことを特徴とする請求項1又は2記載の解析モデル作成方法。

【請求項6】 前記形状データの表面に対する拘束や荷重等の解析用境界条件が入力される解析用境界条件入力工程と、この解析用境界条件入力工程にて入力された解析用境界条件の適用対象となる形状データの表面に含まれる節点を抽出する条件入力節点抽出工程と、この条件入力節点抽出工程によって抽出されたすべての節点に前記解析用境界条件を定義する節点別境界条件定義工程とを備えたことを特徴とする請求項1又は2記載の解析モデル作成方法。

【請求項7】 前記形状データ読み出し工程にて読み出す形状データが、光造形に用いるSTLデータであることを特徴とする請求項1又は2記載の解析モデル生成方法。

【請求項8】 有限要素法による構造解析用の解析モデルデータを演算装置を使用して作成する解析モデル作成方法であって、

前記構造解析の対象となる形状の形状データを読み出す形状データ読み出し工程と、この形状データ読み出し工程にて読み出された形状データを直方体であるボクセルデータに分割するボクセルデータ分割工程と、このボクセルデータ分割工程にて分割されたボクセルデータから解析モデルデータを生成する解析モデルデータ生成工程と、この解析モデルデータ生成工程にて生成された解析モデルデータを表示する解析モデルデータ表示工程とを備え、前記解析モデルデータ生成工程は、ボクセルデータ分割工程にて分割されたボクセルデータの一部又は全部について前記形状データの表面と当該各ボクセルの辺の交点を探索すると共に当該交点のうち前記形状データの表面側のボクセルの一面から遠い三点を抽出する三点抽出工程と、この三点抽出工程にて抽出された三点を含む平面を当該ボクセルの切断面と定義する切断面定義工程と、この切断面定義工程で定義された各ボクセルの切断面と当該ボクセルの辺の交点をフィット節点として定義するフィット節点定義工程とを備えたことを特徴とする解析モデル生成方法。

【請求項9】 前記三点抽出工程は、隣接するボクセルについて既に切断面が定義されている場合には当該隣接するボクセルの切断面と連続する交点を前記三点に代えて抽出する連続切断面抽出工程を備えたことを特徴とする請求項8記載の解析モデル作成方法。

【請求項10】 前記切断面定義工程に続いて、当該切断面が定義されたボクセルのうち当該ボクセルが切断された要素の形状が予め定められた立体形状とならない要素をさらに分割する要素分割工程と、この要素分割工程によって生成された要素の当該分割による分割節点を当該節点と接するボクセルの節点に基づいて拘束する分割節点拘束工程とを備えたことを特徴とする請求項8又は9記載の解析モデル作成方法。

【請求項11】 前記解析モデルデータ表示工程は、前記要素分割工程にて分割された要素と前記切断面定義工程にて定義された要素とを表示用に合成する合成表示機能を備えたことを特徴とする請求項10記載の解析モデル作成方法。

【請求項12】 前記フィット節点定義工程に前後して、前記ボクセルデータ中前記切断面定義工程によって切断面が定義されなかったボクセルを前記構造解析の対象となる形状の内側へ向って段階的に大きくするオクトツリー構造に再定義するオクトツリー再定義工程と、このオクトツリー再定義工程によって再定義されたボクセル間の節点を拘束するオクトツリー内節点拘束工程とを備えたことを特徴とする請求項8記載の解析モデル作成方法。

【請求項13】 解析対象の表面形状が定義された形状

データを読み出す形状データ読出手段と、この形状データ読出手段によって読出された形状データを直方体であるボクセルデータに分割するボクセルデータ分割手段と、このボクセルデータ分割手段によって分割されたボクセルデータから解析モデルデータを生成する解析モデルデータ生成手段と、この解析モデルデータ生成手段によって生成された解析モデルデータを表示する解析モデルデータ表示手段とを備え、

前記解析モデルデータ生成手段は、前記ボクセルデータ分割手段によって生成されたボクセルデータの一部又は全部について前記形状データの表面と重なる当該ボクセルの切断面を抽出する切断面抽出部と、この切断面抽出部によって抽出された切断面と当該ボクセルの辺との交点の座標値を算出すると共に当該座標値の組合わせからなる形状フィット情報を生成する形状フィット情報生成部と、この形状フィット情報生成部によって生成された形状フィット情報を前記ボクセルデータに合成する解析モデル生成部とを備えたことを特徴とする解析モデル作成装置。

【請求項14】 前記形状フィット情報生成部は、前記ボクセル中の切断面の位置の種類に応じて特定の位置に切断面を有するボクセルを予め定められた分割面にてさらに分割する特定要素分割機能と、この特定要素分割機能によって分割された要素の分割節点を隣接する要素の節点で拘束する分割節点拘束機能とを備えたことを特徴とする請求項13記載の解析モデル作成装置。

【請求項15】 演算装置を使用してCADデータから解析モデルデータを生成するための解析モデルデータ作成用プログラムを記憶した記憶媒体であって、前記解析モデルデータ作成用プログラムは前記演算装置を動作させる指令として、解析対象の表面形状が定義されたCADデータを形状データとして読出させる形状データ読出指令と、この形状データ読出指令に応じて読出される形状データのそれぞれ直交する三方向の分割数の入力を受けさせる分割数入力指令と、この分割数入力指令に応じて入力される分割数に基づいて前記形状データを直方体に分割させるボクセルデータ生成指令と、このボクセルデータ生成指令によって生成されるボクセルデータの各辺と前記形状データとの交点を抽出させると共に当該交点を含む切断面を定義させる切断面定義指令と、この切断面定義指令に応じて定義される各ボクセルの切断面と当該ボクセルの辺の交点をフィット節点として定義させるフィット節点定義指令とを備えたことを特徴とする解析モデルデータ作成用プログラムを記憶した記憶媒体。

【請求項16】 前記切断面定義指令は、1つのボクセルに対して切断面が2つある場合には一方の切断面を選択させる切断面選択指令を備え、前記フィット節点定義指令は、フィット節点を有するボクセルのフィット節点と当該ボクセルに接続するボクセルの節点とを拘束するフィット節点拘束工程を備えたことを特徴とする請求項15記載の解析モデルデータ作成用プログラムを記憶した記憶媒体。

【請求項17】 解析対象の形状の構造解析を行う演算装置に読出される解析モデルデータを記憶した記憶媒体であって、前記解析モデルデータが、前記解析対象の形状が表されたCADデータと、当該CADデータについてのそれぞれ直交する三方向の分割数データと、前記CADデータに対して予め指定された面について当該CADデータの指定面と前記分割数データによって分割されるボクセルの辺との交点の座標値を各ボクセルについて三交点を単位とし保持する形状フィットデータと、当該形状フィットデータの各交点を他の交点で拘束する拘束データとを備えたことを特徴とする解析モデルデータを記憶した記憶媒体。

【請求項18】 前記CADデータに対して予め指定された面に対して指定された当該解析対象形状への荷重や拘束などの境界条件を前記形状フィットデータに併設したことを特徴とする請求項17記載の解析モデルデータを記憶した記憶媒体。

【発明の詳細な説明】

【0001】

【発明の属する技術分野】本発明は、解析モデルを作成する方法および装置に係り、特に、構造解析や流体解析に適した解析モデルデータを作成する方法および装置に関する。また、本発明は、解析モデルを作成するためのプログラムを記憶した記憶媒体に関する。

【0002】

【従来の技術】従来、一般的に三次元の形状モデルを作成する場合、三次元CADデータから要素分割を行い、解析モデルを作成する。モデルが複雑になった場合、モデル作成工数は膨大であり、また専門性を必要とする。自動でソリッドモデル（六面体モデル）を作成する方法として、ボクセルデータ（VOXEL: Volume Pixel）を利用する方法が提案されている。ボクセルデータは、三次元の直交座標を利用した立方体の集合で三次元モデルを定義するものであり、「ボクセル」は、二次元でのピクセルに対応する概念である。そして、三次元モデルからFEM要素（解析モデルデータ）を全自動で作成しやすい。

【0003】

【発明が解決しようとする課題】しかしながら、上記従来例では、ボクセルデータが直交座標を基準としているため、形状データを正確に表現するには、非常に細かい分割が必要となり、すると、要素数が膨大となってしまう、という不都合があった。例えば、一辺100[mm]の立方体を1[mm]単位のボクセルにて分割すると、100万要素となってしまう。一方、ボクセルの一要素の大きさを大きくすると、荷重に対する変形や応力集中箇所の最大応力の算出などの解析精度が低下してしまう、と

いう不都合があった。

【0004】例えば、鳥垣俊和他、“ボクセルモデルを用いた数値解析モデルの自動生成および構造解析、位相形状最適設計への応用”，日本機械学会第74期通常総会講演論文集（I）には、自動車のミッションケースのボクセルモデルのモデル数が64,333,160個となり、節点数が7,063,070個となった例が開示されている。この従来例では、通常の解析ソルバで解析できる要素数を上回っているためか、特別な解析ソルバの開発を合わせて行い、スーパーコンピュータを使用してベアリングから軸に伝わる荷重を与え、この荷重による応力の分布を求めたところ、約18時間要した旨記載されている。

【0005】複雑な形状を有するミッションケースやシリンドリックブロック等の構造解析や流体解析の解析結果を利用して、そのシリンドリックブロック等の必要な剛性を維持しつつ軽量とするための最適な形状の模索などを行いたいとしても、上述した例では特別な解析ソルバと計算時間とを必要とするため、シュミレーションを行うために要するコストが大きい、という不都合があった。

【0006】

【発明の目的】本発明は、係る従来例の有する不都合を改善し、特に、複雑な形状の解析対象物であっても、解析精度を悪化させずに要素数を削減しつつ、形状データから要素への分割を自動化することのできる解析モデルを作成する方法および装置を提供することを、その目的とする。本発明はまた、このような解析モデルの生成を行うプログラムを提供することをも、その目的とする。

【0007】

【課題を解決するための手段】そこで、本発明による解析データ生成方法は、解析対象の表面形状が定義された形状データを読み出す形状データ読出工程と、この形状データ読出工程にて読出された形状データを直方体であるボクセルデータに分割するボクセルデータ分割工程と、このボクセルデータ分割工程にて分割されたボクセルデータの一部又は全部について前記形状データの表面によって切断される切断面を定義する切断面定義工程と、この切断面定義工程で定義された各ボクセルの切断面と当該ボクセルの辺との交点をフィット節点として定義するフィット節点定義工程とを備えた、という構成を採っている。これにより前述した目的を達成しようとするものである。

【0008】切断面定義工程が、ボクセルデータの一部又は全部について切断面を定義するため、直方体のボクセルの表面をより解析対象の形状にフィットさせることができ、さらに、フィット節点定義工程が、ボクセルの切断面とボクセルの辺との交点をフィット節点として定義するため、表面については形状フィットされた解析モデルデータを生成する。

【0009】また、本発明による解析データ生成装置

は、解析対象の表面形状が定義された形状データを読み出す形状データ読出手段と、この形状データ読出手段によって読出された形状データを直方体であるボクセルデータに分割するボクセルデータ分割手段と、このボクセルデータ分割手段によって分割されたボクセルデータから解析モデルデータを生成する解析モデルデータ生成手段と、この解析モデルデータ生成手段によって生成された解析モデルデータを表示する解析モデルデータ表示手段とを備えている。しかも、解析モデルデータ生成手段は、前記ボクセルデータ分割手段によって生成されたボクセルデータの一部又は全部について前記形状データの表面と重なる当該ボクセルの切断面を抽出する切断面抽出部と、この切断面抽出部によって抽出された切断面と当該ボクセルの辺との交点の座標値を算出すると共に当該座標値の組合わせからなる形状フィット情報を生成する形状フィット情報生成部と、この形状フィット情報生成部によって生成された形状フィット情報を前記ボクセルデータに合成する解析モデル生成部とを備えた、という構成をとっている。

【0010】本発明では、ボクセルデータ分割手段が、形状データをボクセルデータに分割し、さらに、切断面抽出部が、当該ボクセルデータの一部又は全部について、例えばユーザから指定される形状データの特定の表面に属するボクセルについて、ボクセルの切断面を抽出する。そして、形状フィット情報生成部が、切断面とボクセルの辺の交点の座標値の組合わせからなる形状フィット情報を生成する。座標値の組合わせは、例えば3つの交点の座標値とする。すると、ボクセルデータとは別に、座標値の組による形状フィットデータが生成される。続いて、解析モデル生成部は、形状フィットデータとボクセルデータとを合成することで解析モデルを作成するため、形状フィットを行わない解析対象物の内側や解析の影響度の低い部分については分割処理が単純なボクセルによる要素となり、解析結果に影響する一部又は全部の表面について座標による種々の形状の要素となる。

【0011】また、本発明による解析モデルデータ生成方法又は装置が使用されると、解析モデルデータが生成される。一例としては、解析モデルデータが、前記解析対象の形状が表されたCADデータと、当該CADデータについてのそれぞれ直交する三方向の分割数データと、前記CADデータに対して予め指定された面について当該CADデータの指定面と前記分割数データによって分割されるボクセルの辺との交点の座標値を各ボクセルについて三交点を単位とし保持する形状フィットデータと、当該形状フィットデータの各交点を他の交点で拘束する拘束データとを備える。演算装置は、分割数データに基づいてCADデータを直方体の集合に分割する。そして、形状フィットデータによってボクセルデータの形状をCADデータにフィットさせ、さらに拘束する。

従って、最小単位のボクセルの大きさを比較的大きめとしても、形状フィットさせることで解析精度を良好に保つことができ、しかも、ボクセルを大きめとすることで、解析モデルの要素数が減少する。

#### 【0012】

【発明の実施の形態】以下、本発明の実施の形態を図面を参照して説明する。図1は本実施形態による解析モデル作成方法の構成を示すフローチャートである。図1に示す例では、解析モデル作成方法は、解析対象の表面形状が定義された形状データを読み出す形状データ読み出し工程S1と、この形状データ読み出し工程S1にて読み出された形状データを直方体であるボクセルデータに分割するボクセルデータ分割工程S2と、このボクセルデータ分割工程S2にて分割されたボクセルデータの一部又は全部について前記形状データの表面によって切断される切断面を定義する切断面定義工程S3とを備えている。そして、この切断面定義工程S3で定義された各ボクセルの切断面と当該ボクセルの辺の交点をフィット節点として定義する（フィット節点定義工程）。

【0013】また、解析ソルバ（構造解析を行うソフトウェア）の扱えるデータの条件によっては、1つのボクセルに対する切断面を1つに限定すると、その後の処理が容易となる。この場合、切断面定義工程S3は、1つのボクセルに対して切断面が2つある場合に一方の切断面を選択する切断面選択工程を備えるとよい。また、要素の形状を特定の形状、例えば、四面体、五面体又は六面体の3種類に限定されている場合などは、1つのボクセルに対する切断面を1つとした後、切断面を有するボクセルのうち予め定められた立体形状となっていないボクセルを前記予め定められた立体形状の要素となるまで分割する要素分割工程S4を備えると良い。これにより、形状フィットを行う際の自動化の処理が容易となる。ある実施例では、予め1つの切断面を有する形状を分類しておき、この分類に従って分割を行う。

【0014】また、形状のフィットや要素の分割を行うと、ボクセルの頂点以外の部分に節点が生じる。この節点についても、ステップS5にて、接続されている節点についてはそれぞれ拘束し、さらに要素の辺の上にて浮いてしまう節点についても他の節点に基づいて拘束する（分割節点拘束工程およびフィット節点拘束工程）。

【0015】図1に示す例では、解析対象の形状の内側や表面の一部についてはボクセルデータにて定義され、解析対象の他の部分については形状フィットされた状態となり、さらに、各節点が拘束された解析モデルデータが生成される。また、有限要素法による構造解析を行う解析ソルバの扱えるデータ形式に制限がある場合には、要素分割工程にて要素を当該使用可能なデータ形式の形状となるまで分割するため、種々の解析ソルバに対応可能となる。

【0016】図2は解析モデルに境界条件を定義する処

理の一例を示すフローチャートである。図2に示すように、形状データの表面に対する拘束や荷重等の解析用境界条件が入力される解析用境界条件入力工程S11と、この解析用境界条件入力工程S11にて入力された解析用境界条件の適用対象となる形状データの表面に含まれる節点を抽出する条件入力節点抽出工程S12と、この条件入力節点抽出工程S12によって抽出されたすべての節点に前記解析用境界条件を定義する節点別境界条件定義工程S13とを備えている。この例では、ユーザは形状データの面を単位に解析のための境界条件を入力するだけで、各ボクセルの必要な節点に直接境界条件を入力する必要がない。

【0017】図3はボクセルで一旦定義した解析モデルの特定の部分を形状フィットする処理の一例を示すフローチャートである。形状データの表面に対する形状フィット指令が当該形状データの面毎に入力される形状フィット指令入力工程S21と、この形状フィット指令入力工程S21にて入力された形状フィット指令の適用対象となる形状データの表面に含まれるボクセルを抽出する指令入力ボクセル抽出工程S22とを備えている。この指令入力ボクセル抽出工程S22では、抽出したボクセルを前記切断面定義工程に入力する（ステップS23）。この例でも、ユーザは形状の表面を選択して形状フィットの指定を行うことができるため、各ボクセルを選択するという煩雑な作用を必要としない。

【0018】図1乃至図3に示す例では、基本的な形状をボクセルで生成し、形状の表面のうちユーザに指定された面の形状をフィットさせる。図4（A）に示すように手動で六面体要素2へ分割すると、精度の良い解析モデルとすることができるが、例えばシリンダブロックなどの構造物を手動で分割するには数ヶ月を要してしまうため、ボクセルによる自動分割が提案された。しかし、図4（B）に示すように、ボクセルによる自動分割では、ボクセルの大きさを細かくしないと、実際の形状を良好に反映させることができず、すると、精度を求めて要素数を膨大なものとするか、または要素数を削減して解析精度を落すかの一方の選択を迫られてしまう。

【0019】本実施形態では、図5に示すように、基となる形状データの表面に存在するボクセルデータを細分割して形状をフィットさせているため、比較的少ない要素で分割することができる。これは、形状フィットすることで最小単位のボクセルの大きさを比較的大きめとし、これにより解析精度を落さずに要素数を削減することができるためである。例えば、要素分割数を1/2とすると、全要素数は約1/8となる。

【0020】次に、図6及び図7を参照して切断面定義工程S3（S23）の詳細処理を説明する。ここでは、簡略化のためにボクセルを二次元として考える。図6（A）に示す例では、符号8で示すボクセルデータACDBに符号7で示す太線の形状データ表面が干渉してい

る。ボクセルの外側であるボクセル表面はABであるとする。すなわち、ボクセルの辺CDは解析対象の形状の内部である。図6(A)に示す例では、当該ボクセルの節点ABを切断面との交点EFまで移動させ、新たな要素はECD Fとなる。

【0021】図6(B)に示す例では、ボクセルデータACDBに太線の形状データ表面が干渉している。ボクセル表面はAB又はBDである。切断面はEFとなる。この切断例では、残る要素ACDFEは四面体、五面体および六面体ではない。このため、この三種類の形状しか扱えない解析ソルバのためには、当該要素ACDFEをさらに分割しなければならない。要素分割を行うと、ACGEとEGDFとなる。

【0022】図7(A)に示す例では、ボクセルデータACDBに2つの表面が干渉している。ボクセル表面はABであるとする。この場合には、新たな切断面を符号9の点線で示すEFとして、要素をECD Fとする。この手法は、干渉面とボクセルデータの辺の交点を探索するのみで新しい切断面を定義でき、また、切断された要素の形状が複雑にならず、従って、演算装置を使用した計算が容易となるという利点がある。

【0023】図7(B)は、E、F、G、Hの4点の交点が計算される複雑な場合である。ボクセル表面はABであるとする。図7に示す例では、1つのボクセルに複数の面が干渉しているときには、1つの切断面を選択する。切断面としてGHを定義すると符号9Bで示す点線で分割し要素はACJGとGJDHとなる。切断面としてEFを定義すると、符号9Aで示す点線で分割し要素はECIFとFIDBとなる。このように1つのボクセルに複数の表面が干渉する場合に、切断面を一つ選択すると、その後の要素分割処理等が容易となる。また、図7(B)に示す場合に、要素をECIF、FIJG、GJDHの3つに分割するようにしても良い。その場合、ボクセルの辺CD間の節点IJそれぞれを2つの節点CDにて拘束する。拘束するというのは、荷重等が加えられたときにIJの動作は節点CDの動作に追従させるということである。

【0024】次に、上述した方法の実施に好適な解析モデル作成装置の構成を図8を参照して説明する。図8に示すように、解析対象の表面形状が定義された形状データを読出す形状データ読出手段12と、この形状データ読出手段12によって読出された形状データを直方体であるボクセルデータに分割するボクセルデータ分割手段38と、このボクセルデータ分割手段38によって分割されたボクセルデータから解析モデルデータを生成する解析モデルデータ生成手段16と、この解析モデルデータ生成手段16によって生成された解析モデルデータを表示する解析モデルデータ表示手段22とを備えている。

【0025】しかも、解析モデルデータ生成手段16

は、前記ボクセルデータ分割手段38によって生成されたボクセルデータの一部又は全部について前記形状データの表面と重なる当該ボクセルの切断面を抽出する切断面抽出部16Aと、この切断面抽出部16Aによって抽出された切断面と当該ボクセルの辺との交点の座標値を算出すると共に当該座標値の組合わせからなる形状フィット情報を生成する形状フィット情報生成部16Bと、この形状フィット情報生成部16Bによって生成された形状フィット情報を前記ボクセルデータに合成する解析モデル生成部16Cとを備えている。

【0026】図8に示す例では、切断面抽出部16Aが、形状データとボクセルデータとからボクセルの切断面を抽出し、形状フィット情報生成部16Bが、この切断面に基づいて座標値の組合わせによる形状フィット情報を生成する。そして、解析モデルデータ生成部16Cは、これらボクセルデータと形状フィット情報とを合成することで解析モデルデータを生成する。

【0027】また、形状フィット情報生成部16Bは、ボクセル中の切断面の位置の種類に応じて特定の位置に切断面を有する要素を予め定められた分割面にてさらに分割する特定要素分割機能と、この特定要素分割機能によって分割されたボクセルの分割節点を隣接するボクセルの節点で拘束する分割節点拘束機能とを備えるとよい。これにより、解析ソルバが要求する立体形状のみで解析モデルデータを生成することができる。

【0028】図9は本実施形態のハードウェア資源の構成を示すブロック図である。図9に示すように、CPU12と、CPU12の作業用主記憶部となるメモリ24と、ボクセルデータおよび解析モデルを記憶するディスク25とを備えている。そして、解析モデル作成装置は、ボクセルデータ、解析モデルデータ、および解析結果などを表示するディスプレイ30と、CPU12に対する各種命令を入力するキーボード32とを備えると良い。

【0029】また、解析モデル作成装置は、ネットワーク34を介して解析システム36と接続されている。ボクセルデータ計算システム38は、CADデータ等を解析の精度との関係で最小の大きさとなるボクセルに分割し、ボクセルデータを生成する。また、分割数の入力をユーザに要求するようにしても良い。解析システム36は、本実施形態による解析モデルデータに基づいて例えば有限要素法などにより構造解析や流体解析を行う。

【0030】CPU12は、解析モデル作成用プログラムを実行することで解析モデル発生部16や、データ表示処理部22として動作する。このCPU12の動作により、図1乃至図3に示すフローチャートを実現することができる。演算装置(コンピュータ)を使用してCADデータ(形状データ)から解析モデルデータを生成するための解析モデルデータ作成用プログラムは、コンピュータ10を動作させる指令として、解析対象の表面形

状が定義されたCADデータを形状データとして読出させる形状データ読出指令と、この形状データ読出指令に応じて読出される形状データのそれぞれ直交する三方向の分割数の入力を受付させる分割数入力指令と、この分割数入力指令に応じて入力される分割数に基づいて前記形状データを直方体に分割させるボクセルデータ生成指令と、このボクセルデータ生成指令によって生成されるボクセルデータの各辺と前記形状データとの交点を抽出させると共に当該交点を含む切断面を定義させる切断面定義指令と、この切断面定義指令に応じて定義される各ボクセルの切断面と当該ボクセルの辺の交点をフィット節点として定義させるフィット節点定義指令とを備えている。

【0031】切断面の取扱いに関して、切断面定義指令が、1つのボクセルに対して切断面が2つ以上ある場合には一方の切断面を選択させる切断面選択指令を備え、フィット節点定義指令が、フィット節点を有するボクセルのフィット節点と当該ボクセルに接続するボクセルの節点とを拘束するフィット節点拘束工程を備えた構成とすると、要素の分割処理が容易となる。

【0032】「動作させる指令」というときには、各指令のみで演算装置（コンピュータ）を動作させる指令と、演算装置に予め格納されているオペレーティングシステム等の他のプログラムに依存して当該コンピュータを動作させる指令とのいずれかまたは双方を含む。例えば、図9に示す例では、形状データ読出し指令は、オペレーティングシステムのファイル入出力機能に依存して、所定の名称または所定の領域に格納される形状データをコンピュータに読出させる指令である。従って、ボクセルデータ読出指令は、例えば、オペレーティングシステムに読出し対象のファイル名を引渡す指令である。このように、当該解析モデル作成用プログラムを記憶する記憶媒体であって、当該プログラムをユーザへ搬送する用途の記憶媒体には、例えば「オペレーティングシステムに読出し対象のファイル名を引渡す指令」のみが格納される場合がある。これは、動作させようとするコンピュータのオペレーティングシステム等との関係で定まる。

【0033】解析モデル作成用プログラムファイルは、可搬性のある記憶媒体に格納されて当該コンピュータに供給される。この記憶媒体は、CD-ROMやフロッピーディスクなどデータを不揮発的に記憶しておくものであれば、どのようなものでもよい。また、他のホスト装置から通信回線を経由して補助記憶装置にプログラムを供給することもできる。

【0034】図9に示すCPU12によってこの解析モデル生成用プログラムが実行されると、図8に示す解析モデル作成装置となり、そして、図1に示す解析モデル作成方法が使用される。この解析モデル作成方法の使用によって、解析モデルデータが生成（製造）される。

【0035】解析対象の形状の構造解析を行う演算装置に読出される解析モデルデータは、前記解析対象の形状が表されたCADデータと、当該CADデータについてのそれぞれ直交する三方向の分割数データと、前記CADデータに対して予め指定された面について当該CADデータの指定面と前記分割数データによって分割されるボクセルの辺との交点の座標値を各ボクセルについて三交点を単位とし保持する形状フィットデータと、当該形状フィットデータの各交点を他の交点で拘束する拘束データとを備える。また、CADデータに対して予め指定された面に対して指定された当該解析対象形状への荷重や拘束などの境界条件を前記形状フィットデータに併設すると良い。

【0036】この解析モデルデータでは、分割数データと、形状フィットデータとにより解析モデルを表現するため、データ容量が小さく、さらに、解析モデルを実際に生成または表示する場合には、分割数からボクセルデータを生成し、当該ボクセルデータに形状フィットデータを合成するため、解析モデルの生成や表示処理を高速に行うことができ、また、基準となる形状をボクセルで定義し、ユーザから指示された表面について形状フィットデータにて最適化しているため、従来例と比較して要素数を大幅に減少させることができる。

【0037】図10に円柱形状物1をボクセルで表現した例を示す。形状を忠実に再現するためには、非常に細かい分割が必要となる。図11に形状フィットを行った解析モデルデータの一例を示す。図11に示す例では、表面のボクセルデータが節点移動と要素再分割されている。符号40で示す節点は多点拘束が必要な節点である。

【0038】

【実施例】次に、本発明の実施例を図面を参照して説明する。本実施例では、三次元CADデータから変換されたSTLデータを利用してボクセルデータを再分割し、形状をフィットさせる。STLデータは、光造形のためのデータ形式で、三次元の表面形状を三角形の平面で構成したデータである。ほとんどすべての汎用CADがこのデータ出力をサポートしている。STLデータは、本来、紫外線硬化樹脂を用いたラピッド・プロットタイピング・マシン（液状の樹脂にレーザ光を当てて硬化させ、積層したモデルを作成する機械）にCADから渡すデータ形式である。STLデータは、三頂点の座標値と法線方向のデータで三角形を表し、この三角形の集合で対象物の形状を表している。法線方向のデータは、どちらの面が表であるかを表すものである。

【0039】図12に本実施例の動作例を示す。図12に示すように、本実施例では、有限要素法による構造解析用の解析モデルデータを演算装置を使用して作成する。この解析モデルデータ作成方法は、構造解析の対象となる形状の形状データを読出す。そして、形状データ



を直方体であるボクセルデータに分割する（ステップS31）。続いて、隣接するボクセルについて既に切断面が定義されているか否かを確認し（ステップS32）、切断面が定義されている場合には当該隣接するボクセルの切断面と連続する交点を前記三点に代えて抽出する（ステップS33、連続切断面抽出工程）。

【0040】一方、隣接するボクセルに切断面が定義されていなければ、ボクセル表面から遠い三交点を抽出する（ステップS34、三点抽出工程）。さらに、連続する切断面が2個以上ある場合には、また、ボクセル表面から遠い三点の組が2つ以上ある場合には、切断面を一面に特定する（ステップS35）。特定されなかった面に応じた節点は、ボクセルの頂点まで節点を移動させる等の処理を行う。

【0041】さらに、切断面を有するボクセル（要素）をその要素の形状で分類する（ステップS36）。そして、当該切断面が定義されたボクセルのうち当該ボクセルが切断された要素の形状は予め定められた立体形状であるか否かを確認する（ステップS37）。続いて、予め定められた立体形状とならない要素を分割する（ステップS38、要素分割工程）。続いて、要素分割工程S38によって生成された要素の当該分割による分割節点を当該節点と接するボクセルの節点に基づいて拘束し（分割節点拘束工程）、さらに特定された切断面とボクセルの辺の交点である節点についても拘束を加える（ステップS39）。

【0042】また、望ましい実施例では、ボクセルデータ中前記切断面定義工程によって切断面が定義されなかったボクセルを前記構造解析の対象となる形状の内側へ向って段階的に大きくするオクトツリー構造に再定義するオクトツリー再定義工程と、このオクトツリー再定義工程によって再定義されたボクセル間の節点を拘束するオクトツリー内節点拘束工程とを備えとよい。すると、形状の内側は大きいボクセルで定義されることとなり、この場合、解析モデルデータの要素数をさらに減少させることができる。

【0043】図13に切断面定義の例を示す。符号8で示す直方体がボクセルであり符号8Aで示す図中上方を形状の外側、左方下部を形状の内側とする。符号42で示す点線がSTL面であり、符号41で示す4つの交点が探索される。本実施形態では、このようにSTL面とボクセルとが干渉する場合、ボクセル表面8Aから最も遠い三点を抽出する。その三点で特定される平面が、斜線を加えた符号43で示す切断面となる。

【0044】具体的な切断面定義処理例としては、まず、1つの六面体要素（ボクセルデータ）と干渉するSTLデータの面が2つ以上となる場合には、六面体データ面のうち形状の表面に存在する1つの面を特定し、メモリーに格納する。2つ以上の面が存在する場合には、例えば面番号の小さい面を選択する。そして、六面体デ

ータの各辺とSTLデータの複数面の交点を計算し、メモリーに格納する。続いて、特定した1面からの距離が小さな三点を選択し、新たに1つの平面を定義する。

【0045】また、このような切断面は隣接するボクセルにおいても生じている可能性がある。従って、既に切断面が定義されているのであれば、隣接するボクセルの切断面についてはその切断面と連続するように切断面を定義すると良い。また、STL面とボクセルとの交点が探索されたとき、その交点をボクセルの辺の中心位置に移動させると、隣接するボクセル間の連続性を保ちやすい。

【0046】図12に示すように、本実施例では、第1段階で作成されたボクセルデータに対して三次元CADデータから作成されたSTLデータの各面での切断形状を探索し、そのパターンに応じてFEMモデルとして定義可能な立体に分割する。一般的に、有限要素法の解析ソルバでは、四面体、五面体、六面体の立体を利用できる。

【0047】図14及び図15には、六面体を平面で切断した場合に想定される形状を列記する。図16及び図17に、それぞれの形状をFEMモデルとして定義可能な立体に分割した例を示す。切断面を1つとする場合、すべての場合で最大四要素までの分割でFEMモデルを作成することができる。また、この要素作成で浮いた節点（隣合った複数要素で共有されていない節点）が存在する可能性があるが、多点拘束の境界条件でこの問題を解決する。

【0048】図14乃至図17に示す分割例では、切断面を1つとしている。六面体を平面で切断したときの切断面自体は、三角形、四角形、五角形、六角形のいずれかとなる。図14および図15に、想定されるすべての切断形状を示す。すべての切断形状は、反対側の形状が存在する。これらすべての形状に対して節点の移動又は要素の再分割を行うことにより、形状フィットが可能となる。それぞれの場合にどのように要素を再構成するかを図15及び図16に示す。図16(1)の符号44で示す斜線を引いた面が(1)の形状での分割面である。以下、斜線を省略し点線で分割面を示す。

【0049】図14乃至図17の(1)乃至(12)の場合で、それぞれどのように形状フィットするかを場合分けして説明する。

【0050】図14又は図16の(1)で示すケース1では、五面体と七面体とに分割される（図では七面体を例示する）。五面体はそのまま要素として利用可能であり、七面体は六面体と五面体の2つに分割する。ケース2では、四面体と七面体とに分割される。四面体はそのまま要素として利用可能であり、七面体は六面体と2つの五面体とに分割する。ケース3では、六面体（面が五角形と三角形を含む）と、七面体とに分割される。六面体を2つの五面体に、七面体を五面体と六面体と2つ

の四面体との4つに分割する。ケース4では、2つの六面体に分割される。この場合、節点の移動で要素が作成可能である。ケース5では、STL面とボクセルの辺の交点が基の節点と近接してあるトレランス内であり、2つの五面体に分割される。この場合、そのまま要素となる。ケース6の場合には、面が六角形と三角形とを含む六面体2つに分割される。両者ともに六面体を五面体(2つ)と六面体の3つに分割する。

【0051】図15又は図17に示す例では、まず、ケース7の場合、STL面とボクセルの辺の交点が基の節点と近接してあるトレランス内であり、四面体と七面体とに分割される。四面体はそのまま要素として利用できる。七面体は五面体と2つの四面体との3つに分割する。ケース8では、七面体と六面体(面が五角形と三角形とを含む)の2つに分割される。七面体は2つの五面体と3つの六面体とに分割し、六面体は2つの五面体に分割する。ケース9では、七面体と四面体とに分割される。七面体は2つの五面体に分割し、四面体はそのまま要素となる。ケース10では、七面体と四面体とに分割される。七面体は五面体と四面体とに分割し、四面体はそのまま要素となる。ケース11は、ケース8の反対側の形状であるため同様の処理をする。ケース12では、ケース3の反対側の形状であるためやはり同様の処理をする。

【0052】これらの操作で要素を再分割した場合には、隣合った要素で節点の位置がずれたり、または不整合が発生する可能性がある。この場合には、各ボクセルにすべての隣合ったボクセルの情報を持たせ、共有する辺で2つ以上の節点が存在した場合に節点をまとめる機能を追加する。また片方のボクセルの辺上にだけ節点が存在する場合には、多点拘束を自動生成する機能を追加する。多点拘束というのは、2つの節点を独立とし、1つの従属節点の変位を以下の式で拘束するものである。従属点の(X3)が2つの独立点(X1, X2)の中点の場合には、 $2 \times X3 = X1 + X2$ 。中点ではない場合には、辺の長さに対するX3の位置の比を算出する。

【0053】次に、本実施例の動作例を説明する。まず、ハードディスクに格納されたSTLデータを読み込み、ボクセルデータを自動生成し、ハードディスクに書き出す。そして、演算装置にて全ボクセルデータのうち、表面形状に存在するボクセルデータを選択してメモリ上に格納する。次に、CRT上にSTLデータと表面のボクセルデータとを表示する。さらに、ユーザ(オペレータ)が画面上のSTL面(形状フィットを行う面)を選択し、その情報をメモリーに転送する。そして、演算装置がメモリ上に存在するSTLデータ(選択されたデータ)とボクセルデータ(表面のデータ)とを読み込み、それぞれのSTLデータとボクセルデータの関係を調べ、干渉するすべての組み合わせを検索する。さらに、1つのボクセルデータに2つ以上のSTLデータの面が干渉する

場合、前述したアルゴリズムで1つの切断面を新規作成する。続いて、全ボクセルデータをSTLデータで切断し、上記のアルゴリズムに従って場合分けをする。場合分けに応じて節点の移動及び要素の再分割を行い、解析モデルデータをハードディスクに書き出す。

【0054】本実施例では、ボクセルデータの表面をSTL面にフィットさせることにより、境界条件設定(解析のための荷重・拘束条件等)の入力作業が簡易になる。STL面に荷重・拘束条件を定義し、その情報をコンピュータ内部で解析モデルに受渡すことが可能となる。

【0055】図18乃至図22に本実施例による形状フィットを行った解析モデルデータの解析結果を示す。図18(A)に示すような丸穴付き薄板1を引張った場合、引張っている方向に対して最も半径の広がっている部分1aに最も高い応力が発生する。この応力は対称的に現れるため、1/4モデルを準備して解析を行った。ボクセルデータでは直方体の集合で形状を表しているため、穴のまわりを綺麗に表すことができないため、ボクセル(1)では穴を小さく表し、ボクセル(2)では穴を大きく表した。また、形状フィットは上述した手法によって生成される形状をここでは手動で定義した。

【0056】丸穴付き薄板の引張り計算結果を図18(B)に示す。図18(b)に示すように、ボクセル(1)とボクセル(2)の解析結果は異なり、さらに、理論値に対してそれぞれ2.8%、12.7%の誤差が生じている。一方、形状フィットさせた例では、誤差は-1.2%となった。

【0057】図19にボクセル(2)の形状を、図20に形状フィットした例を示す。図21はボクセル(2)の解析結果、図22は形状フィットした解析結果を示す。図22に示すように、形状フィットした解析モデルの方がより理論値に近い位置で応力の集中が見られた。

【0058】上述したように本実施形態によると、三次元形状のSTLデータからボクセルデータを自動作成するため、モデル作成工数を大幅に短縮することができ、さらに、STLデータとボクセルデータとを同じデータベース上に格納するため、形状フィットを行うための表面形状とボクセル表面の空間的な関係を把握することができる。すると、ユーザは、構造解析のための境界条件を各節点に対して与える必要がなく、STLデータの面に対して与えれば良い。従って、境界条件の入力が容易となる。さらに、1つのボクセルと複数のSTL面が干渉する場合には、1つの切断面を新規に作成するため、ボクセルを切断するパターンを少なくし、形状フィットを自動的に実行することができる。また、ボクセルを平面で切断した形状の場合分け情報を有するため、ボクセルデータを細分割して解析モデルデータを自動的に作成することができる。そして、ボクセルデータの表面形状をSTLデータに基づいて再構成し、形状フィットさせ

るため、比較的少ない要素数で解析モデルを作成することができ、このため、汎用の解析ソフトウェアを利用することができる。

【0059】

【発明の効果】本発明は以上のように構成され機能するので、これによると、本発明による解析モデル作成方法では、切断面定義工程が、ボクセルデータの一部又は全部について切断面を定義するため、直方体のボクセルの表面をより解析対象の形状にフィットさせることができ、さらに、フィット節点定義工程が、ボクセルの切断面とボクセルの辺との交点をフィット節点として定義するため、表面については形状フィットされた解析モデルデータを生成することができ、すると、解析精度の良い六面体であるボクセルを形状の要素としつつ、さらに表面形状をフィットさせた解析モデルデータを演算装置を使用して自動的に生成すると共に、人手による要素分割と比較して解析精度を悪化させることなく、解析モデルの要素数を少なくすることができ、すると、複雑な形状であっても要素数を増大させることなく自動的に要素分割を行うことができるため、例えばシリンダブロックの最適化を行うなど種々の解析を短時間で行うことができるという従来になかった優れた解析モデルを作成する方法を提供することができる。

【0060】また、本発明による解析モデル作成装置では、解析モデル生成部が、形状フィットデータとボクセルデータとを合成することで解析モデルを作成するため、形状フィットを行わない解析対象物の内側や解析の影響度の低い部分については分割処理が単純なボクセルによる要素とし、また、解析結果に影響する一部又は全部の表面について座標による種々の形状の要素とするため、上記方法と同様に、解析精度の良い六面体であるボクセルを形状の要素としつつ、さらに表面形状をフィットさせた解析モデルデータを演算装置を使用して自動的に生成すると共に、人手による要素分割と比較して解析精度を悪化させることなく、解析モデルの要素数を少なくすることができる。さらに、形状フィットデータとボクセルデータとを分離して扱うため、解析モデルへの変換や解析モデルデータの表示処理などにおいて処理速度の早いボクセルデータを基礎としつつ特定領域のみ形状フィットデータを用いることができ、このため、解析モデルへの変換処理や表示処理を高速にすることができるという従来になかった優れた解析モデル作成装置を提供することができる。

【図面の簡単な説明】

【図1】本発明の実施形態の構成を示すフローチャートである。

【図2】解析用拘束条件を入力する処理例を示すフローチャートである。

【図3】形状フィットデータを入力する処理例を示すフ

ローチャートである。

【図4】解析モデルデータの比較例を示す説明図であり、図4(A)は手動で分割した例を示す図で、図4(B)はボクセルデータのみで構成した例を示す図である。

【図5】図4に示した比較例に対応する本実施形態での解析モデルデータの一例を示す説明図である。

【図6】図6(A)および(B)は切断面を定義する処理の一例を示す説明図である。

【図7】図7(A)および(B)は切断面を定義する処理の他の例を示す説明図である。

【図8】本発明の解析モデル作成装置の一実施形態の構成を示すブロック図である。

【図9】図8に示す装置のハードウェア資源の構成を示すブロック図である。

【図10】ボクセルデータで円柱形状を表現した比較例を示す説明図である。

【図11】図10に示すボクセルデータの形状をフィットさせた例を示す説明図である。

【図12】本発明の一実施例の構成を示すフローチャートである。

【図13】図12に示す切断面定義処理の一例を示す説明図である。

【図14】図14(1)～(6)は1つの切断面を有する要素の形状例を示す説明図である。

【図15】図15(7)～(12)は図14に続く要素の他の形状例を示す説明図である。

【図16】図16(1)～(6)はそれぞれ図14に示す形状を分割した例を示す説明図である。

【図17】図17(7)～(12)はそれぞれ図15に示す形状を分割した例を示す説明図である。

【図18】本実施例での実験結果を示す説明図であり、図18(A)は解析対象物の一例を示す図で、図18(B)は解析結果を示す図表である。

【図19】ボクセル(2)による解析モデルデータの一例を示す説明図である。

【図20】形状フィットした解析モデルデータの一例を示す説明図である。

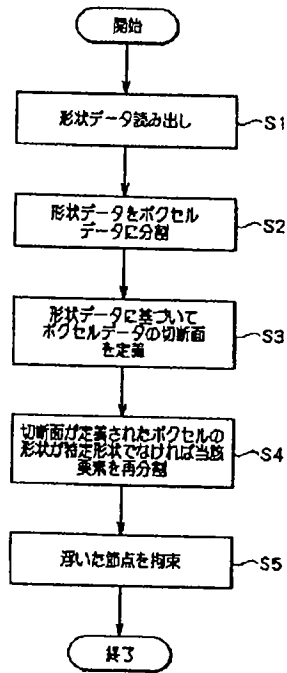
【図21】図19に示すボクセル(2)の解析結果を示す説明図である。

【図22】図20に示す形状フィットした解析モデルデータの一例を示す説明図である。

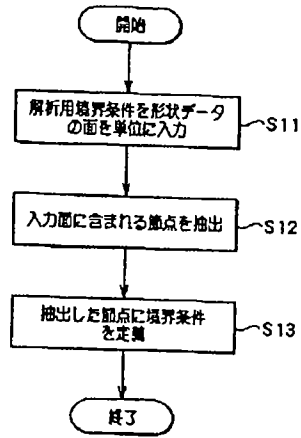
【符号の説明】

- 1 ボクセル
- 3 オクトツリー
- 10 コンピュータ(演算装置)
- 12 形状データ読出手段
- 16 解析モデル発生部(解析モデルデータ作成手段)
- 22 データ処理表示部(解析モデルデータ表示手段)

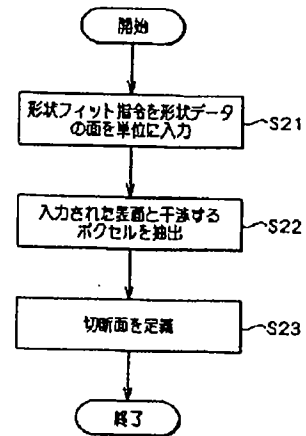
【図1】



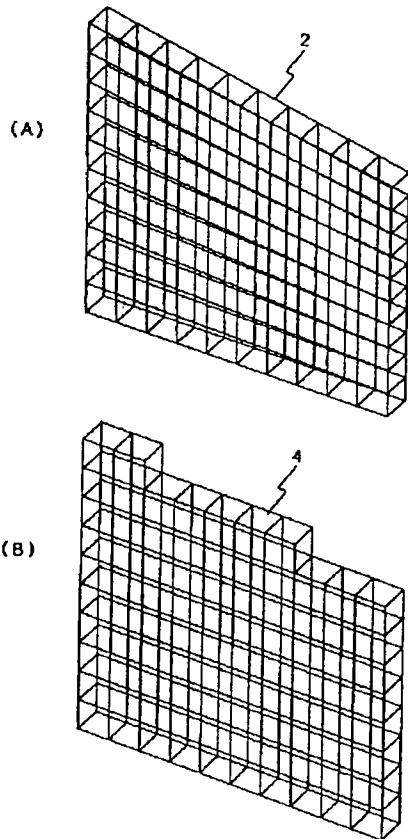
【図2】



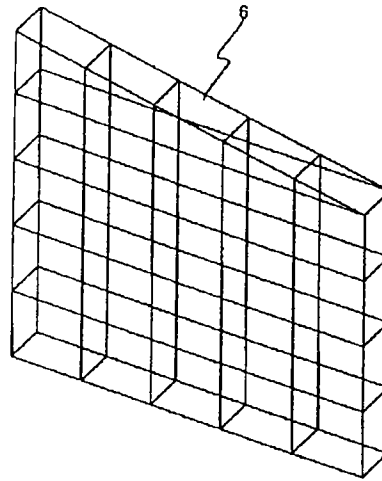
【図3】



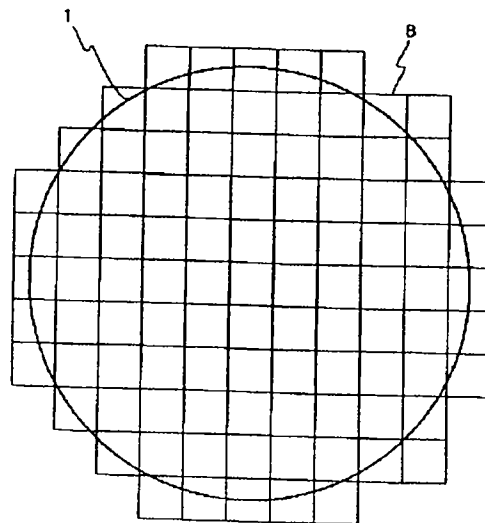
【図4】



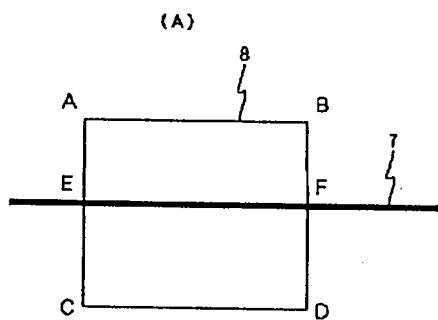
【図5】



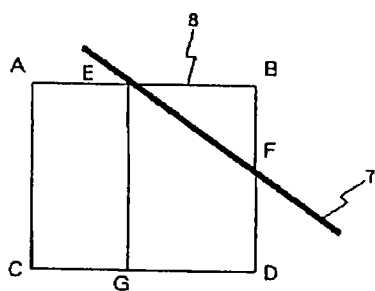
【図10】



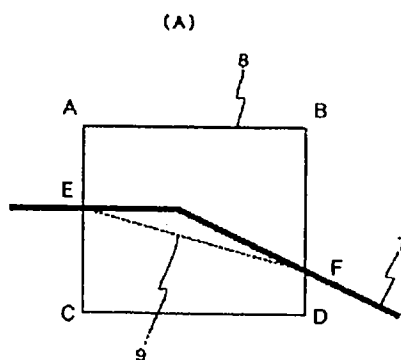
【図6】



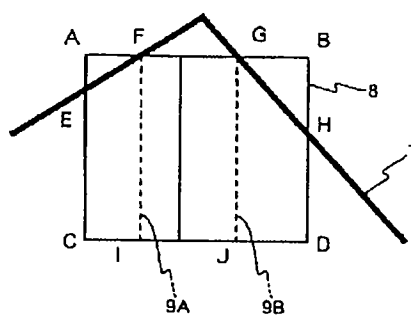
(B)



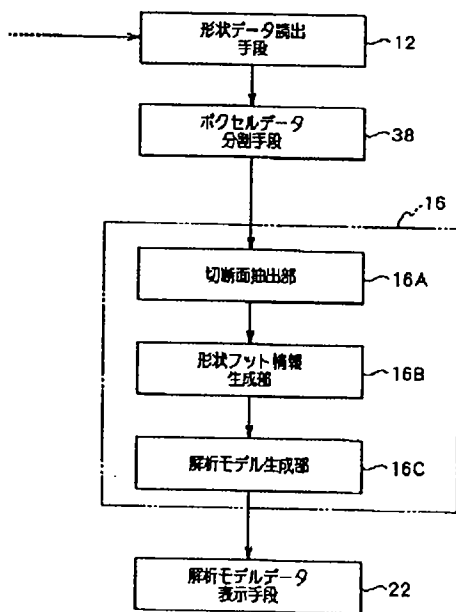
【図7】



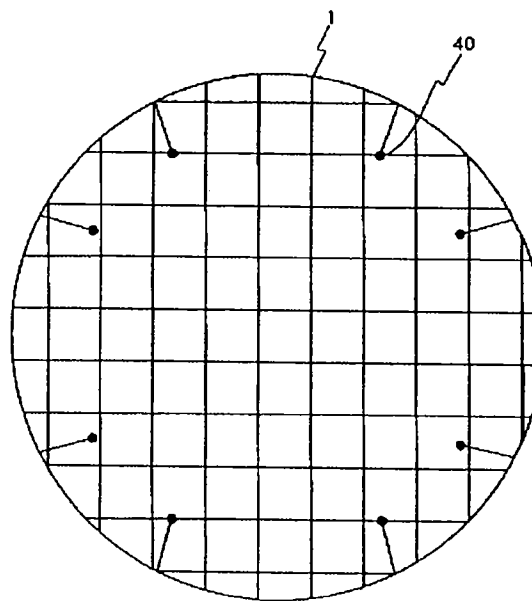
(B)



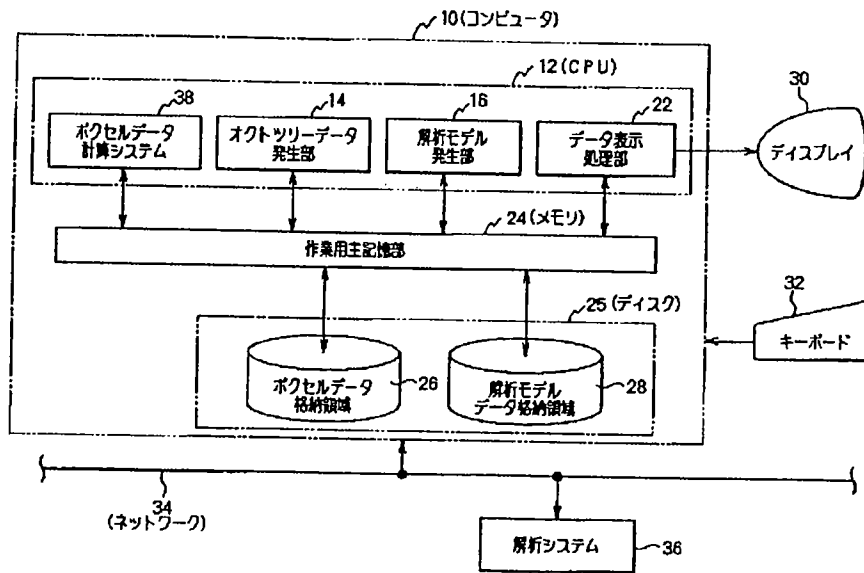
【図8】



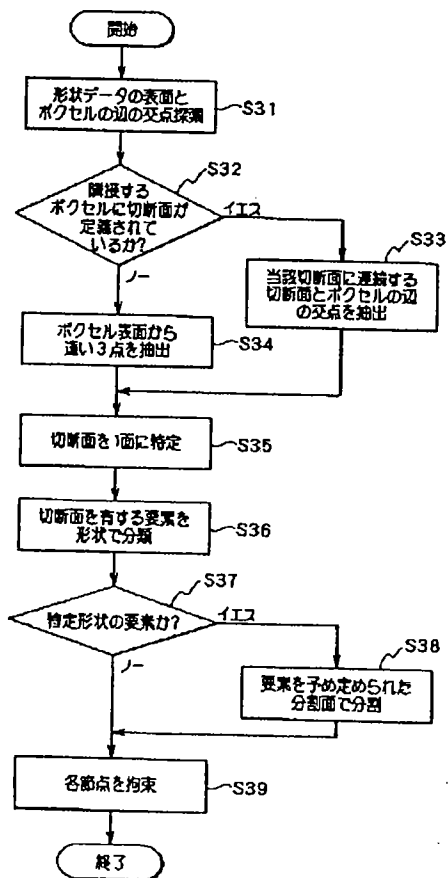
【図11】



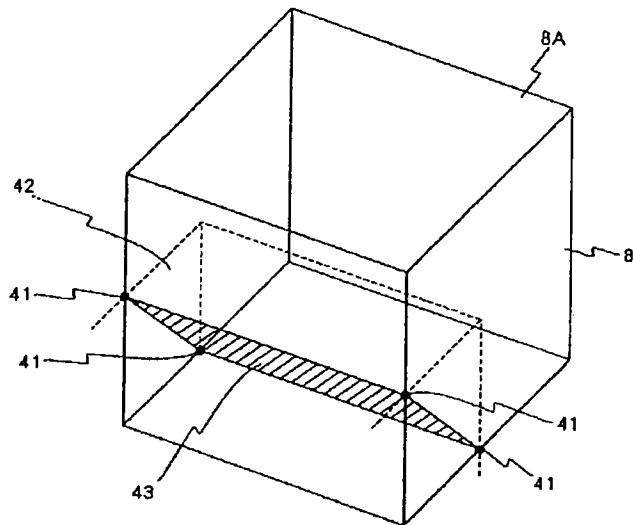
【図9】



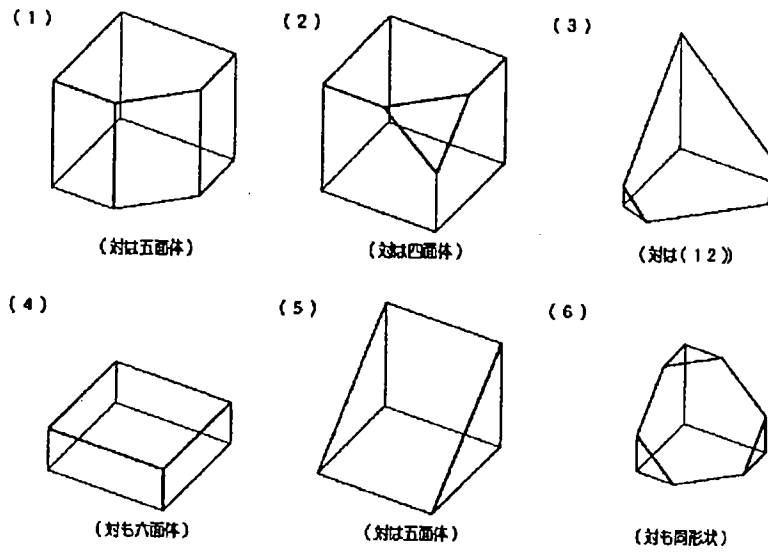
【図12】



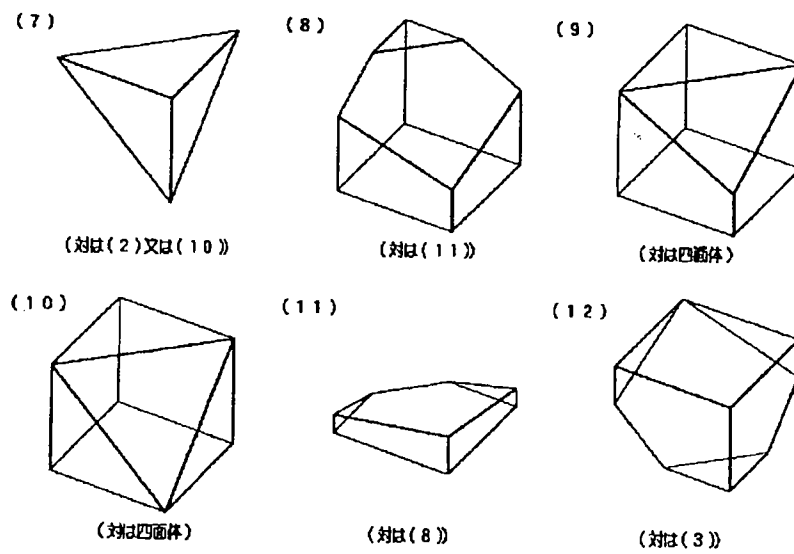
【図13】



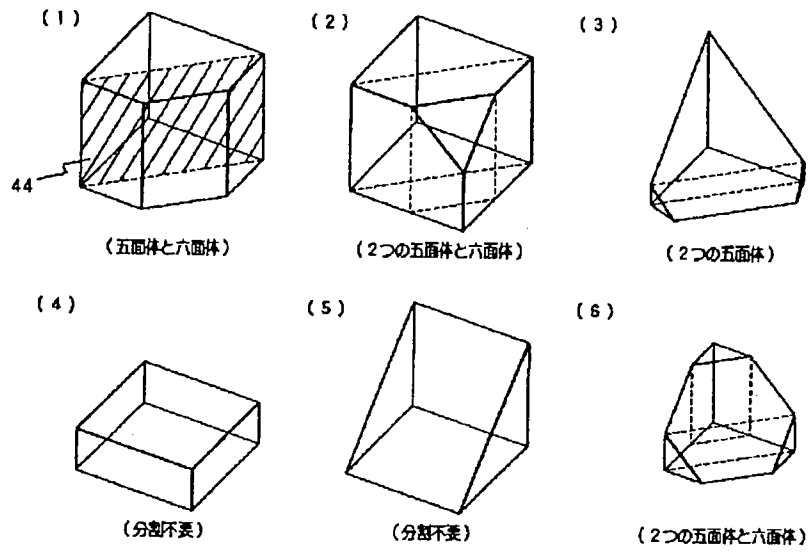
【図14】



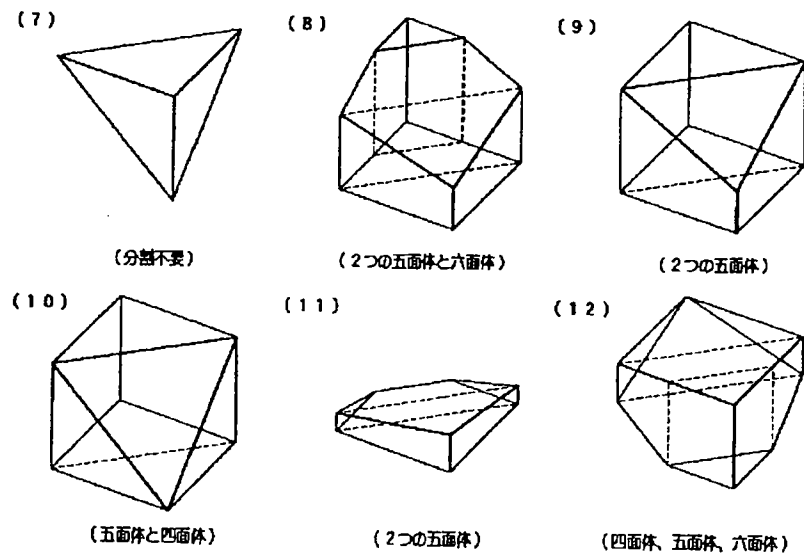
【図15】



【図16】

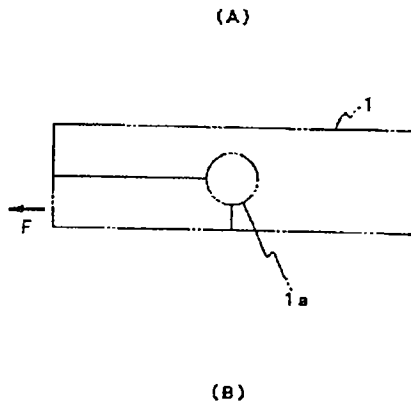


【図17】





【図18】

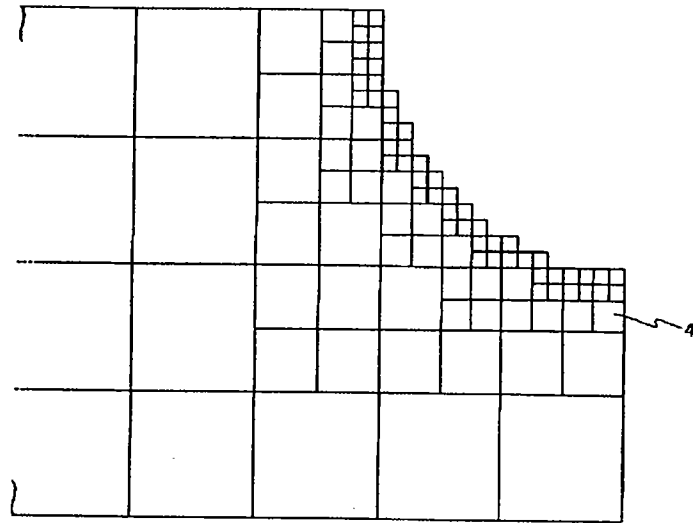


丸穴付き薄板の引っ張り計算結果

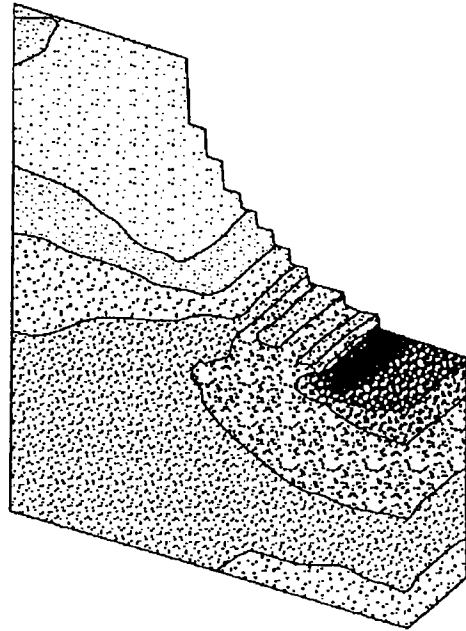
理論値:  $4.34 \text{ mN/mm}^2$ 

要素タイプ	主応力値	理論値との誤差
ボクセル(1)	$4.46 \text{ mN/mm}^2$	+2.8%
ボクセル(2)	$4.89 \text{ mN/mm}^2$	+12.7%
形状フィット	$4.29 \text{ mN/mm}^2$	-12.0%

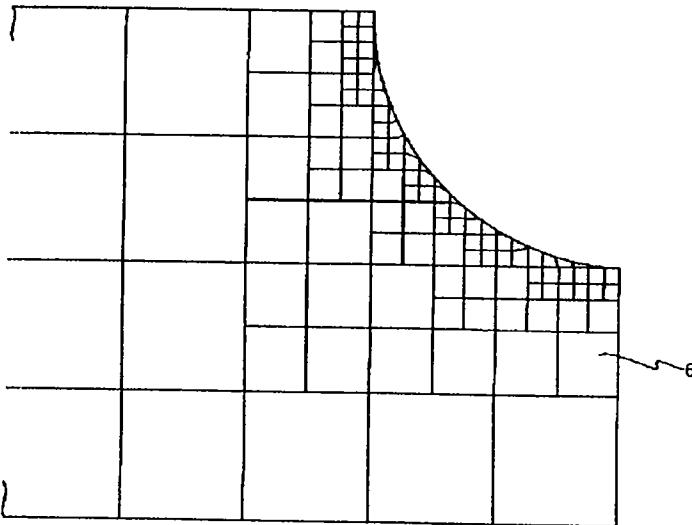
【図19】



【図21】



【図20】



【図 22】

